

## 特集

## 長周期・長時間継続地震動とその対応

3.11の東日本大震災以降、従前から課題となっていた「長周期地震動」への対応が一層喫緊のものになった。また、直近では、発生が予測される駿河湾から日向灘の「南海トラフ」沿い巨大地震時による高層ビルの揺れは、3.11を上回る強さでかつ大きくなるとの予測もある。こうした中で本誌では「長周期・長時間継続地震動のメカニズムと対応」を紹介することとした。

## 長周期・長時間地震動の生成と長周期建築構造物の応答

福和 伸夫 名古屋大学

## 1 はじめに

## 1.1 長周期地震動問題と検討の必要性

1968年に霞ヶ関ビルが竣工して以降、わが国では、大都市を中心に高層建築物や免震建築物が多数建設されてきた。これらの建築物は、その固有周期が長周期であることを利用し、地震動の揺れの周期帯域から隔離することにより、あたかも「柳に風」と振る舞うことで、地震の揺れに対応するものと考えられていた。

わが国で強震観測が始まったのは1953年である。1968年は、耐震設計の見直しのきっかけとなった十勝沖地震が発生した年でもあり、強震観測を始めてまだ15年しか経っていないので、新潟地震での川岸町の観測記録くらいしか大きな地震の記録はなかった。このため、観測された地震動の多くは短周期成分が卓越していた。エルセントロ地震動(1940年インペリアルバレー地震)やタフト地震動(1952年カーンカウンティ地震)なども、長周期の揺れは顕著ではなかった。この結果、高層ビルの建設当初には、長周期の揺れへの配慮は十分ではなかったように思われる。私自身も、子供心に盲目的に

高層ビルの安全性を信じていたように感じる。

1980年代になって、地盤震動研究者から大規模堆積平野の「やや長周期地震動」について問題提起はされたが、高度な技術を駆使して設計・施工された高層ビルに対する安心感からか、建築構造技術者が長周期地震動に懸念を感じることは少なかった。20世紀の間は、設計用地震動として告示波のような模擬地震動の利用は義務付けられてなく、長周期の揺れが卓越する八戸地震動(十勝沖地震)は用いられていたものの、エルセントロ地震動やタフト地震動などの、共通のスペクトルの谷間である2秒前後の建物が数多く建設されていた。

一方で、兵庫県南部地震後に制定された地震防災対策特別措置法により、地震調査研究推進本部が設立され、活断層調査、地震発生長期評価、堆積平野地下構造調査、K-NET・KiK-Netなどの強震観測網整備、地震動予測地図策定などが精力的に行われ、強震動研究が大いに進展した。また、21世紀に入って、中央防災会議を中心として、東海地震や東南海・南海地震、首都直下地震などに対する検討が本格化し、大

都市における高層建物や免震建物の急増も相まって、長周期地震動に対する検討の必要性も指摘されるようになってきた。

強震観測網が整備された後、2000年の鳥取県西部地震以降に大きな地震が頻発し、大規模堆積平野を中心に長周期の揺れが卓越した地震動が多く観測されるようになった。特に、2003年の十勝沖地震における苫小牧での石油タンクの被害や、2004年の東海沖地震・新潟県中越地震などでの大都市での高層建物の強い揺れなどがきっかけとなって、マスメディアも長周期地震動問題を取り上げるようになり、社会からの関心も高まった。

## 1.2 わが国の長周期地震動対策への取り組み

こうした中、文部科学省では、2007年から首都直下地震防災・減災特別プロジェクト「都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究」を実施し(<http://www.bosai.go.jp/hyogo/syuto-pj/index.html>)、20層の鉄骨高層建物の実大振動台実験を行い、実在高層建物の耐震性能や制震改修など有効性について検討を行ってきた。

日本建築学会でも、2008年以降

毎年、長周期地震動対策に関する公開研究集会を開催し、2011年3月4日には「長周期地震動対策に関する日本建築学会の取り組み」と題した記者会見を行った (<http://www.aij.or.jp/jpn/databox/2011/20110309-1.pdf>)。また、国土交通省でも「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」をまとめ、2010年12月に意見募集を開始し、2011年2月28日に意見募集の受付を締め切っていた。

東北地方太平洋沖地震が発生したのは、まさしくこの直後だった。首都圏では、多くの人々が高層建物の中で長く続く長周期の強い揺れを経験した。また、大阪府咲洲庁舎では、52階で最大137cmの変位振幅が観測され、内装材や防火戸等での破損や、エレベータの停止や閉じ込めが発生した(咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、<http://www.pref.osaka.jp/otemaemachi/sascibi/bousaitai.html>)。これを受けて、府に「咲洲庁舎の安全性と防災拠点のあり方等に関する専門家会議」が設置され、府庁舎移転の妥当性や制震補強などの必要性などが検討された (<http://www.pref.osaka.jp/otemaemachi/sascibi/senmonkakaigi.html>)。

また、中央防災会議に設置された「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」([http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/index\\_higashi.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/index_higashi.html)) や「防災対策推進検討会議」(<http://www.bousai.go.jp/chubou/suishinkaigi/index.html>) の検討結果を受けて、「南海トラフの巨大地震モデル検討会」や「南海トラフ巨大地震対策検討WG」が設置され、最大クラスの地震に対する地震動予測や地震対策についての検討が進んでいる。気象庁にも2011年11月に「長周期地震動に関する情報の

あり方検討会」が設置され、情報提供の方法についての議論が始まっている ([http://www.seisvol.kishou.go.jp/cq/tyoshuki\\_kentokai/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/cq/tyoshuki_kentokai/index.html))。

このように、本特集は今まさに長周期・長時間地震動への対応が本格化しようとするときに企画された。長周期・長時間地震動は、規模の大きな地震の時に盆地状の大規模堆積平野で生成されやすい。規模の大きな地震は、周期の長い地震波を長時間にわたって放出する。長周期の揺れは遠くまで伝わりやすく、さらに西日本の太平洋側に位置する南海トラフでは付加体が発達しており、長周期の揺れを伝えやすい。

そして、大都市が立地する大規模な堆積盆地は長周期の揺れを増幅させ、盆地内に地震波を留め、揺れの継続時間を延長させる。現在、発生が懸念されている南海トラフ巨大地震は、大都市の高層建物を直撃するため、長周期地震動の問題がクローズアップされている。

長周期地震動は、震源で生成され、地震波が伝播し、堆積平野で増幅され、建物に入力し建物を応答増幅させる。これらのプロセスが重なり合うことで非常に大きな建物応答となる。以下、順を追って解説する。

## 2 震源での長周期・長時間地震動の生成

地震の規模が大きくなると震源域が広がり、地震時のすべり量も大きくなる。マグニチュード( $M$ ) 8クラスの地震の場合には、震源域の大きさは100～150km程度、平均

的なすべり量 $D$ は4～5m程度である。マグニチュードが増減すると、震源域の大きさやすべり量は変化する。一般に、マグニチュードが1大きくなると地震エネルギー $E$ や地震モーメント $M_0$ は32倍になり、震源域の面積 $S$ は10倍に、震源域の大きさ(幅 $L$ ・長さ $W$ )やすべり量 $D$ は3.2倍になる。モーメントマグニチュードを $M_w$ 、断層面の剛性率を $\mu$ と記すと、これらは、

$$\begin{aligned} \log_{10} E &= 4.8 + 1.5M \\ M_0 &= \mu DS \quad S = LW \\ M_w &= (\log M_0 - 9.1) / 1.5 \end{aligned}$$

の関係がある。地震時には、断層はすべり速度 $v$ で食い違い、破壊速度 $V_f$ で破壊が伝播する。これらの速度は、地震の規模には関係なく、すべり速度は1(m/s)程度、破壊の伝播速度は2.5～3(km/s)程度である。

$M$  8クラスの地震では、それぞれの場所で断層がすべるのに5秒程度かかり、断層全体が破壊するのに30～60秒程度かかる。 $M$  9クラスだと、90～180秒程度、 $M$  7クラスだと10～20秒程度の破壊時間になり、これらは、東北地方太平洋沖地震や兵庫県南部地震での継続時間に符合する。

断層面は全体が均等にすべるわけではなく、強く固着したアスペリティで大きくすべり、地震波を強く放出する。アスペリティの面積が断層全体の面積の10%程度だとし、アスペリティのすべり量を断層の平均すべり量の倍程度だとすると、 $M$  8クラスの地震ではアスペリティ内でのすべり時間は10秒程度、破壊の継続時間は10～20秒程度になる。

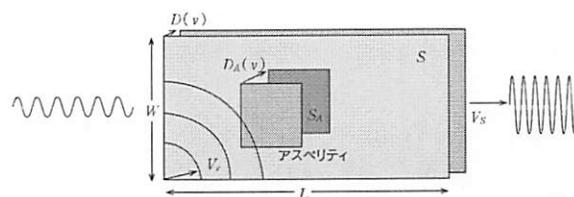


図1 震源断層の破壊

破壊が伝播するといゆるドップラー効果が生じる。車が近づいて来るときは音が短周期かつ大きく聞こえるのに対し、車が遠ざかるときには音が長周期かつ小さくなるのと同じである。これと同様に、破壊の伝播により、断層破壊との位置関係で地震動の周期や強さも変化する。例えば、断層の破壊速度  $V_f$  が地震波の伝播速度  $V_s$  の0.7倍だったとすると、断層の延長線上の破壊進行側では揺れの継続時間は0.3倍となり、振動数が3.3倍に、逆側では継続時間が1.7倍となり、振動数が0.59倍になる（継続時間は  $1 \pm V_f/V_s$  に増減する）。

このように、震源から放出される地震波の周期や継続時間は、地震の規模やアスペリティの大きさ、破壊の伝播、震源と観測点との位置関係などによって変動する。

一般に、震源から放出される揺れの震源スペクトルは、長周期では地震モーメント  $M_0$  に対応して震源域の大きさ（例えば長さ  $L$ ）の3乗に比例し、短周期では震源域の大きさに比例する。そしてこの境界振動数は震源域の大きさに逆比例する。このことから、規模が大きな地震では高層建物には大きな影響を及ぼすのに対し、短周期の揺れは長周期ほど増大しないため、中低層建物への影響は相対的に小さいことが分かる。

### 3 長周期地震動の伝播と減衰

地震波は、震源から四方八方に広がる。震源が点の場合には、S波やP波などの実体波は震源から球面状に広がり、レーリー波やラブ波などの表面波は地表面に沿って円筒面状に広がる。波が幾何的に広がることによって地震波が減衰することを幾何減衰と呼ぶ。地震波が伝わる波面ではエネルギーが保存されるので、実体波は震源からの距離  $R$  と共に

$1/R$  で減衰し、表面波は  $1/R^{1/2}$  で減衰する。ただし、震源域に近い場所では震源を点と見なすことができないため、震源域近傍では揺れの強さは頭打ちとなる。

幾何減衰に加え、地盤材料の持つ減衰や波動が散乱することによる減衰作用もある。地盤材料の減衰定数を  $h$  とすると、実体波は距離と共に  $\exp(-h\omega R/V_s)$  のように減衰する。 $\omega/V_s$  は波長に、 $\omega R/V_s$  は伝播する距離内の波の数に相当するので、波の数と共に振幅が減ることになる。周期の長い波ほど波長が長くなり、波の数は減るので、結果として長周期の波は減衰しにくく、遠くまで到達することになる。

このように距離と共に減衰することを距離減衰と呼ぶ。最大加速度の距離減衰式としてよく使われる福島・田中式では最大加速度  $A_{max}$  は、気象庁マグニチュード  $M_J$  を用いて下記のように表される。

$$\log A_{max} = 0.51M_J - \log(R + 0.006 \times 10^{0.51M_J}) - 0.0033R + 0.59$$

上式を、最大加速度  $A_{max}$  と震度  $I$  との関係式である河角式に代入すると、

$$I = 2\log A_{max} + 0.7 = 1.02M_J - 2\log(R + 0.006 \times 10^{0.51M_J}) - 0.0066R + 1.18$$

となり、震源からの距離がほぼ同じであれば、マグニチュードが1増大すると、 $A_{max}$  は3倍に、震度は1増大することになる。最大加速度や震度は短周期の揺れを表現しているので、図2に示したように、短周期の震源スペクトルが  $10^{0.5M_w}$  に比例していたことに対応する。

このことは、長周期地震動には当てはまらない。長周期地震動の場合には、震源スペクトルは  $10^{1.5M_w}$  に比例すること、波長が長くなって距離による減衰が小さく遠方まで揺れが到達し、遠方では表面波が卓越し幾何減衰をしにくくなるなど、地震模

とと共に揺れが増大しやすくなる。

図3は、KiK-Netの基盤観測点で観測された地震動の最大加速度・速度・変位の距離減衰特性を示したものである。長周期の影響が大きく表れる変位の距離減衰の傾きは、加速度と比べ小さいことに注意を要する。

これに加え、西日本では南海トラフ沿いに存在する厚い堆積物（付加体）が長周期地震動の距離減衰や継続時間に影響を及ぼすことが指摘されている（文部科学省：東海・東南海・南海地震の連動性評価研究、連動性を考慮した強震動・津波予測および地震・津波被害予測研究）。首都圏での地震観測記録を分析すると、日本海溝沿いの地震と南海トラフ沿いの地震とは、同じ距離・マグニチュードでも西日本の地震の方が長周期の揺れが強くなる傾向がある。

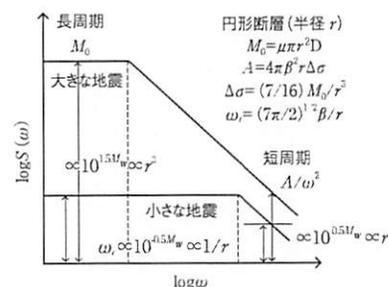


図2 震源スペクトル

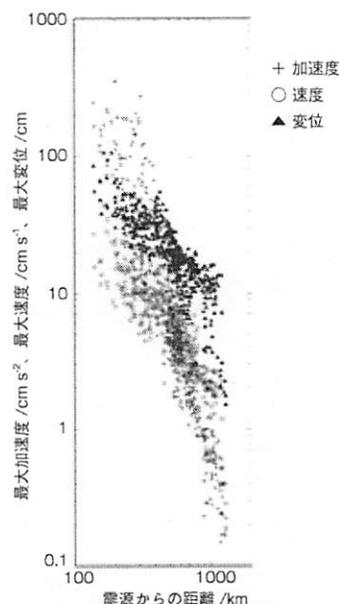
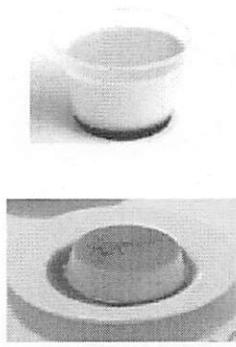


図3 KiK-Net基盤観測点の最大加速度・速度・変位の距離減衰



プリンと羊羹をお皿の上に並べて、皿を左右に揺すってみると、プリンの方が大きく揺れ、強く揺れるのは特定の周期の時であることが分かる。この周期は、プリンが柔らかいほど長くなる。大きさが同じババロア・プリン・ヨーグルトの揺れの周期を比較してみるとよい。さらに、プリンを上から順に食べて、プリンの厚さを減らしていくと周期が短くなる。これが表層地盤での揺れの増幅であり、地盤固有の卓越周期を表している。地盤の揺れは、皿とプリン(羊羹)の堅さ(S波速度  $V_s$ )の比で増幅され、増幅される周期  $T(=4H/V_s)$  はプリンのS波速度  $V_s$  と厚さ  $H$  によって決まる。

#### 4 堆積盆地内での長周期地震動の増幅と継続時間の伸長

さらに、容器の中にある状態のプリンとお皿の上に載せたプリンとで揺れ方を比べてみると、容器の中にある方が短周期で揺れ、中心位置が大きく揺れ、長く揺れ続ける。これは、プリン周辺が容器で拘束されて周期が短くなり、容器内で波動が反射屈折することで新たな周期が加わり、容器から外に波のエネルギーが逃げていけなためである。

これと同じことが大規模な堆積平野でも生じている。関東平野、濃尾

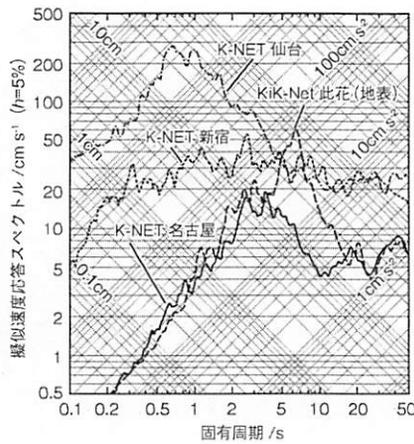


図4 東北地方太平洋沖地震の仙台・新宿・名古屋・大阪の擬似速度応答スペクトル

平野、大阪平野などの堆積平野は、いずれも周辺を山地に囲まれ、山地から流れ込む河川の堆積物などが厚く堆積した堆積盆地である。堆積層の厚さは平野によって異なり、各平野内でも場所によって厚さが変化している。このため一概には言えないが、関東平野では7~10秒、濃尾平野では3~4秒、大阪平野では4~6秒で揺れやすい。

図4は、東北地方太平洋沖地震での仙台、東京(新宿)、名古屋、大阪の地表視測記録の擬似速度応答スペクトルを比較したものである。距離の離れた名古屋や大阪では、短周期の揺れは大きく減衰しているが、長周期の揺れは短周期ほど減衰せず、大阪平野や濃尾平野では、各卓越周期で揺れが顕著に増幅している。特に大阪の6秒前後の揺れが仙台や東京を上回っていることには注目したい。

#### 5 建物内での揺れの増幅

地盤と同じように、建物にも揺れやすい周期がある。図5のように、消しゴムと竹ひごを使って串団子モデルを作ってみると、簡単に振動実験ができる。竹ひごの本数で剛性を変え、消しゴムの数や位置を変化させることで、重さや建物高さを変え

られる。また、団子の数を複数にすれば、高次モードの振動形も実感できる。この実験から分かることは、高層建物では長周期化すると共に減衰が小さくなり、長周期・長時間の揺れで共振が育ちやすくなるということである。串団子モデルを持つ手は地盤に相当する。高層化すると手に比べて相対的に建物が柔らかくなるので、動的相互作用効果である地下逸散減衰が減少し、低減衰化する。

初期静止状態の1自由度系に、円振動数  $p$  の単位調和地動  $y_0 = \cos pt$  が作用すると、建物応答は、

$$y = A \left[ \cos(pt - \theta) - e^{-h\omega t} \left( \cos \theta \cos \omega' t + \frac{h \cos \theta + (p/\omega) \sin \theta}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega' t \right) \right]$$

$$A = \frac{(p/\omega)^2}{\sqrt{|1 - (p/\omega)^2|^2 + 4h^2(p/\omega)^2}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2h(p/\omega)}{1 - (p/\omega)^2} \quad \omega' = \omega \sqrt{1-h^2}$$

となる。ここに、 $A$  は地動変位に対する応答変位の増幅効果を、 $\theta$  は地動変位と応答変位の位相差を表し、 $\omega'$  は減衰を考慮した減衰固有円振動数を示している。

上式の第1項は定常振動解を、第2項は自由振動解を示しており、地震波が作用し始めた直後は自由振動項が支配的となるが、時間と共に自由振動項は減衰し、定常振動項のみが残る。固有振動数や減衰定数が大きければ ( $h\omega \gg 1$ )、自由振動項は短時間で減衰して定常振動に速やかに収束するが、減衰が小さい長周期構造物 ( $h\omega \ll 1$ ) では定常振動となるのに長時間がかかる。 $h$  が微小で  $p = \omega$  となる共振時には、上式は、

$$y = \frac{1}{2h} \left[ \sin \omega t - \frac{e^{-h\omega t}}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega' t \right] \approx \frac{1}{2h} (1 - e^{-h\omega t}) \sin \omega t$$

となる。無限時間後の定常応答変位は地動変位の  $1/2h$  倍となり、減衰

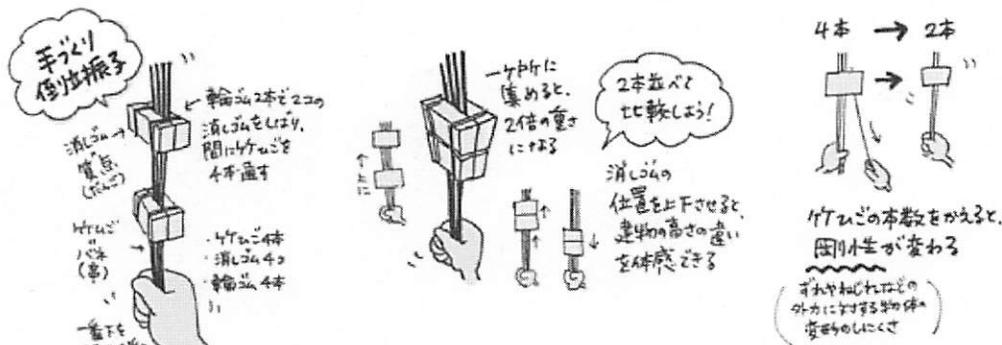


図5 消しゴムと竹ひごを使った共振実験

が小さいほど揺れが増幅され、共振振幅に育つのに時間がかかる。ちなみに、定常状態の振幅 $1/2h$ の $\beta$ 倍になるために必要な波の数は、下式となる。

$$n = -\ln(1 - \beta) / 2\pi h$$

$1/2h$ の9割に振幅が育つのに要する波の数は $0.3665/h$ で与えられるので、減衰定数が1%だと45倍の応答になるのに37波が必要なのに対し、20%の減衰がある場合だと、2.25倍の応答になるのに2波が必要となる。すなわち、減衰定数1%で周期5秒の250m級の高層建物の場合には、共振が育つのに3分も必要となるのに対し、等価減衰が20%程度ある周期5秒の免震建物ではたった10秒で共振状態に至ることになる。

このように、高層建物のような低減衰長周期建物では、建物の固有周期と地震動の卓越周期との近接度合と、地震動継続時間の問題が極めて重要である。巨大地震時の大規模堆積平野の長周期地震動問題が顕在化している理由はまさしくこの点にある。

一方、兵庫県南部地震の震源域の揺れのように、マグニチュード7クラスの地震での震源断層直近の揺れはパルス的になる。そこで簡単な例として、減衰の無い1自由度系のシステムに、単位三角関数波 $\cos pt$ が1周期分(継続時間 $T_0 = 2\pi/p$ )入力した場合の問題を考える。この答えは、次式のように求めることができる。

$$y = \frac{p^2}{\omega^2 - p^2} (\cos pt - \cos \omega t) = \frac{2p^2}{\omega^2 - p^2} \sin \frac{\omega + p}{2} t \sin \frac{\omega - p}{2} t$$

$$t \leq T_0 = \frac{2\pi}{p}$$

$$y = -\frac{p^2}{\omega^2 - p^2} \left[ \cos \omega t - \cos \left( \omega t - \frac{2\pi\omega}{p} \right) \right]$$

$$= \frac{2p^2}{\omega^2 - p^2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi\omega}{p} \right) \sin \frac{\pi\omega}{p}$$

$$t > T_0 = \frac{2\pi}{p}$$

建物の固有周期と入力周期が一致した場合、( $p = \omega$ )の結果は下式となる。

$$y = \frac{\omega t}{2} \sin \omega t \quad t \leq T_0 = \frac{2\pi}{p}$$

$$y = \pi \sin \omega t \quad t > T_0 = \frac{2\pi}{p}$$

最大変位応答はパルス入力終了後に生じ、入力振幅の3.14倍となる。ちなみに、パルス地震動の場合には固有周期を中心とした周期のパルスに対して、おおむね入力振幅の2~3倍程度の応答を示す。

参考のために、固有周期と入力周期が一致した場合について減衰を考慮した結果を示すと、

$$y = \frac{1}{2h} (1 - e^{-h\omega t}) \sin \omega t$$

$$t \leq T_0 = \frac{2\pi}{p}$$

$$y = \frac{1}{2h} e^{-h\omega t} (e^{2\pi h} - 1) \sin \omega t$$

$$t > T_0 = \frac{2\pi}{p}$$

となる。最大応答振幅は非減衰の時に入力振幅の3.14倍だったが、減衰定数が1%の時は入力振幅の約3

倍、20%の時は約1.5倍となる。このように、パルスの入力に対しては減衰付加による応答低減効果が比較的小さい。長継続時間による共振応答に対しての減衰付加による低減効果の大きさは対照的である。

## 6 おわりに

以上、長周期・長時間地震動の現状について述べた。南海トラフ巨大地震における大規模堆積平野の継続時間が長い地震動と、活断層近傍の継続時間の短い地震動とでは、地震動の性質も長周期構造物の応答特性も大きく異なる。高層建物や免震建物などの長周期建物の設計にあたっては、震源・伝播・地盤増幅の周期特性を考慮した長継続時間の地震動と、断層近傍のパルスの地震動の両者を適切に考慮することが望まれる。



名古屋大学  
防災連携研究センター長  
教授  
福和 伸夫  
(ふくわ のぶお)

(略歴)  
1981年 名古屋大学大学院工学研究科 建築学専攻  
1981年 清水建設株式会社入社  
1991年 名古屋大学工学部助教授  
1997年 名古屋大学先端技術共同センター 教授  
2001年 名古屋大学大学院環境学研究科教授  
2012年 現職